

Lantbrukshögskolan
Institutionen för
VÄXTNÄRINGSLÄRA och JORDBEARBETNING
Ayd. för växtnäringens försök

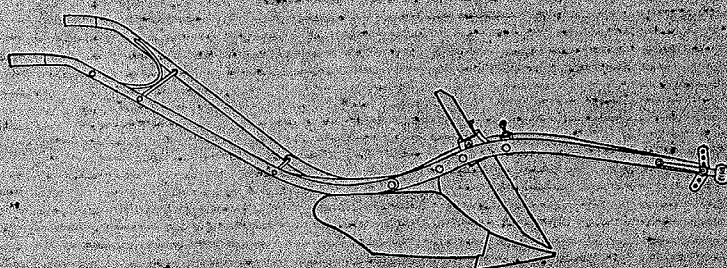
Lantbrukshögskolan
UPPSALA

LANTBRUKSHÖGSKOLAN
Inst. för markvetenskap
Dräneringsvetenskap
S-750 07 Uppsala 7

RAPPORTER FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Agricultural College of Sweden, 750 07 Uppsala 7

Reports from the Division of Soil Management



NR 9

1968

Bo Thente:

LUFTPERMEABILITETSMÄTNING SOM
MARKFYSIKALISK UNDERSÖKNINGS-
METOD.

Lantbrukshögskolan, Uppsala 7

Rapporter från jordbearbetnings-
avdelningen.

Nr 9. 1968

Bo Thente:

LUFTPERMEABILITETSMÄTNING SOM MARK-
FYSIKALISK UNDERSÖKNINGSMETOD.

<u>Innehållsförteckning</u>	Sid.
I. Inledning.	3
II. Teori.	4
III. Metodik.	7
IV. Beräkningar.	8
V. Försök.	10
1. Försök i bevuxen jord med olika packningsintensiteter.	10
2. Jämförelse mellan lucker och packad jord i två olika jordarter.	12
3. Undersökningar av orägelbundenheter i utveckling hos höstrybs.	13
4. Laboratorieundersökningar.	15
5. Luftpermeabilitetens variation inom en begränsad yta.	16
6. Verifiering av Kozeny - Carman - ekvationen.	17
VI. Sammanfattning.	21
VII. Tabeller, figurer och bilder.	23
VIII. Litteraturhänvisningar.	40

I. Inledning

Alla de bearbetningsåtgärder som en åker jord underkastas före sådden syftar till att ge jorden så lämpliga fysikaliska egenskaper som möjligt för grödans optimala utveckling. Av stort intresse för forsknings- och försöksverksamheten inom jordbearbetningen är därför att man har tillgång till väl definierade och tillämpbara metoder att mäta jordens fysikaliska beskaffenhet. Det verkar omöjligt att försöka få fram en teori som kan beskriva alla de fysikaliska egenskaper som bestämmer förhållandena i en åkerjord. Lika svårt är det att konstruera ett standardmätvärde, som ger ett allmänt gällande, karaktäristiskt tal för olika jordar efter olika bearbetningar. Man måste därför inskränka sig till markfysikaliska delbegrepp när en teoretiskt utformad mätmetod skall överföras i praktiskt bruk. En metod att föra ett sådant delbegrepp till lösning är att mäta jordens förmåga att släppa igenom en luftström av konstant tryck. Mätning av denna s.k. luftpermeabilitet har rönt stort intresse som komplement till andra markfysikaliska mätmetoder. Anledningen till detta är de grundläggande fakta en sådan mätning kan ge. Det motstånd marken ger en genomströmmande luftmängd lämnar viktiga slutsatser om anordningen och upplagringen av de enskilda markpartiklarna, som tillsammans bestämmer markens struktur. Vidare är markens luftpermeabilitet av avgörande betydelse för jordmikroorganismernas och växtrötternas luftutbyte. Eftersom samspelet mellan jord och växt är ett av jordbearbetningens grundproblem tycks mätning av jordens luftpermeabilitet vara en lovande utgångspunkt för att utröna markstrukturens inflytande på växternas utveckling.

Den största nackdelen med den här metoden har länge varit dess tekniska utformning, som gjort det svårt att praktiskt utnyttja den. Förbättrad och förenklad apparatur har emellertid gjort luftpermeabilitetsmätningen tillgänglig för kontinuerligt försöks- och forskningsarbete. Även dess teoretiska utformning har förbättrats så till vida att den gjorts mer jämförbar med andra mätmetoder.

Det har arbetet kommer att behandla några försök som gjorts med en luftpermeameter av nedan beskriven typ. Alla försök är av praktisk natur, d.v.s. mätningar som skulle kunna göras i ett vanligt jordbearbetningsförsök. I samtliga fall har jämförelse gjorts med någon annan mätmetod, framför allt vid bestämning

av jordens porositet. De resultat som redovisas är att betrakta som en allmän överblick av metodens för- och nackdelar och inte som en noggrann undersökning av dess lämplighet.

II. Teori

Omfattningen av och målsättningen med det här arbetet medger inte en närmare genomgång av de teorier som ligger till grund för jordens förmåga att släppa genom luft. En kort framställning är emellertid nödvändig.

Grundlagen för alla teoretiska betraktelsesätt av markens genomsläpplighet bildar Darcys filterekvation. Denna ekvation uttrycker ett samband mellan en vätskas flythastighet (v) genom ett poröst material som jord och ett konstant verkande fall (J). Enligt Darcy är strömningshastigheten direkt proportionell mot detta fall. För man en allmänt gällande proportionslitetskonstant, k , erhålles

$$v = k \cdot J$$

Den per tidsenhet genomströmmande vätskemängden (Q) är också beroende av provets tvärsnittyta (A), så att

$$Q = k \cdot J \cdot A$$

För filtersystemet jord med genomströmmande vatten betecknas konstanten som k_f -värde, ett värde, som spelar en stor roll bl.a. i fråga om dränering av en jord. När man istället för vatten har luft som diffunderande ämne är det av många skäl omöjligt att använda sig av ovanstående ekvation. Bl.a. bestäms k_f -värdet inte enbart av markens konfiguration, utan också av vattnets olika egenskaper, framför allt av dess viskositet vid olika temperaturer, växlande elektrolythalt m.m. Vidare kan man om en gas användes naturligtvis inte räkna med ett konstant hydrostatiskt tryck. Fallet (J) måste därför omräknas till det tryck med vilket luften pressas in i jorden. Det är alltså nödvändigt att härleda en ny ekvation som gäller för luft istället för vatten. Detta är möjligt genom att på lämpligt sätt kombinera Darcy-ekvationen med två andra fundamentala fysikaliska lagar, nämligen Poiseuilles och Bernoullis satser. En sådan kombination leder fram till ett nytt k -värde, k_1 , som är ett specifikt värde för genomflödet av luft genom jorden. Med k_1 utlöst erhålles ekvationen

$$k_1 = \frac{\pi \cdot r^4}{8 A} \cdot \frac{d \cdot g}{\eta}$$

där r = porernas medelradie
 d = gasens täthet

A = provets tvärsnittyta

η = gasens viskositet

Av de båda kvoter som finns på högra sidan av denna ekvation beror den första endast på jordprovets fysikaliska egenskaper, medan den andra är beroende av den använda gasens eller vätskans egenskaper. Slår man samman den första kvoten får man

$$k_1 = k_{00} \cdot \frac{dg}{\eta}$$

Den nya koefficienten, k_{00} , är ett av den använda gasen eller vätskan oberoende värde, som karakteriserar jordens genomsläpplighet bättre än k_f och k_1 och kallas därför för permeabilitetskoefficient (Zunker 1938).

Om man kombinerar de nu erhållna ekvationerna och sätter in den tryckskillnad som är av fundamental betydelse i Bernoullis och Poiseuilles satser så erhålles för gasflödet i en riktning vid konstant temperatur och försummelse av gravitationskraften

$$Q = \frac{k_{00}}{\eta} \cdot A \frac{\Delta P}{l} = \frac{k_{00}}{\eta} \cdot A \frac{p_1 - p_2}{l}$$

där p_1 = inströmningstryck i en punkt $X = 0$

p_2 = utströmningstryck " " " $X = l$

eller för en oändligt liten tryckskillnad i en koordinataxelriktning

$$Q = \frac{k_{00}}{\eta} \cdot A \frac{dp}{dx}$$

Denna formel kan matematiskt omformas till

$$Q_m = \frac{dM}{dt} = Q_2 d_a = \frac{k_{00}}{\eta} d_a A \frac{p_1^2 - p_a^2}{2lp_a}$$

där M = massan

Q_2 = utflödet varje tidsenhet

d_a = atmosfärluftens täthet

p_a = " tryck

t = tiden

Denna ekvation är grunden för alla mätningar av luftpermeabiliteten som är beroende av Darcys sats (Kirkham 1947). I en så heterogen blandning som jord är en tillräckligt noggrann mätning av de storheter formeln innehåller nästan omöjlig att göra. I praktiken använder man sig därför av approximativa formler, som är anpassade efter den apparatur man använder. För den princip som har använts här har man härlett det approximativa sambandet

$$k_{00} = \frac{\Delta V}{p_1 - p_2} \cdot \frac{\eta \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{t} \approx \frac{V}{p} \cdot \frac{\eta \cdot l}{A \cdot t}$$

där V och p är medelvärde av ΔV och Δp . Denna approximativa formel

är starkt förenklad jämfört med det exakta sambandet, men är fullt användbar som arbetsekvation (Grover 1955) (Tanner & Wengel 1957).

En inskränkning av arbetsekvationen uppkommer genom den roll Poiseuilles sats spelar. Denna sats, som rör i viskositeten i Darcy-ekvationen, gäller endast för laminär strömning. Någon turbulens tillåts alltså inte. Laminär strömning föreligger så länge det Reynoldska talet (R) är mindre än 1. R definieras som

$$R = \frac{d \cdot v \cdot 2r}{\eta}$$

där d = gasens eller vätskans täthet

v = hastigheten

r = rörets eller kapillärens radie

η = gasens eller vätskans viskositet

Med alla storheter konstanta utom hastigheten inser man lätt att denna måste vara mycket liten för att R inte skall överskrida värdet 1. Hur stor hastigheten skall vara måste bestämmas experimentellt varje gång, eftersom en matematisk bestämning är omöjlig på grund av det osäkra värdet på r i ett jordprov.

Alla de ekvationer som blivit anförda här innehåller uttryck för jordprovets tvärsnittyta A och längd l . Ekvationerna gäller således endast för ett prov med en bestämd mätbar utformning. Av stort intresse ur praktisk synpunkt är därför en ekvation som gäller för provtagning direkt i en bevuxen åkerjord. Problemet att ersätta kvoten A/l med en konstant G för den bevuxna jorden har lösts med hjälp av elektriska analogiexperiment (Evans & Kirkham 1950). De på så sätt erhållna G -värden har gjort det möjligt att använda Darcy-ekvationen även vid mätning i en bevuxen jord, under förutsättning att cylinderjordens permeabilitet är lika stor som den omgivande jordens. Formeln blir

$$k_{00} = \frac{V}{p} \cdot \frac{\eta}{G \cdot t}$$

Permeabilitetskonstanter som k , k_f och k_{00} kan förutom genom direkt mätning också indirekt bestämmas genom jordens porvolym. Denna fråga har stor teoretisk och praktisk betydelse eftersom man därigenom har möjlighet att jämföra olika mätmetoder. Den ekvation som man vid den här typen av beräkningar utgår ifrån kallas Kozeny - Carman - ekvationen (Kozeny 1933).

$$v = \frac{d \cdot g}{C \cdot \eta} \cdot \left(\frac{V_B}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{f^3}{(1-f)^2} \cdot J$$

där v = strömningshastighet

d = gasens eller vätskans spec. vikt

V_B = volym fast material

f = porvolym

η = viskositet

O = markpartiklarnas yta

J = hydraulisk gradient

C = Carman-konstant. Empiriskt lika med 5,0 (Carman 1956)

Kombineras denna ekvation med Darcy-ekvationen erhålles

$$k_{00} = \left(\frac{v}{O} \right)^2 \cdot \frac{f^3}{C (1 - f)^2}$$

Denna ekvation ligger till grund för alla beräkningar av porvolymen ur permeabiliteten och tvärtom. En särskild osäkerhetsfaktor för dessa beräkningar är storheten O/V , den så kallade specifika ytan. För att bestämma den använder man sig av en kornstorleksanalys. För grovkorniga jordar får man tillfredsställande resultat, medan ekvationens användbarhet är tveksam för finkorniga och särskilt för starkt aggregerade jordar (Lambe 1954).

III. Metodik

Luftpermeameteren (bild 1) utarbetad av Kmoch (1961) liknar i sin uppbyggnad en gasometer (fig. 1). Den består av en vattenfylld ytterkanna (1) och en mindre cylinder (2) som är sluten upptill (flöte). Sätts flötet med den öppna sidan mot vattenytan så står ett rör (8) och en lång gummislang (10) i förbindelse med jordprovet och medverkar till att flötet längs en "styrstång" (9) långsamt i proportion till jordens permeabilitet, sjunker ner i ytterkannans vatten. Den tid som det tar för flötet att sjunka en viss sträcka mäts med ett stoppur (5). Tryck och volym av den luft som strömmar genom jorden bestämmas av flötets utformning. Den största felkällan vid en sådan här mätning är tidtagningen. Därför har man gjort hela förloppet automatiskt. På flötet är fastsatt en släpbygel (3), som vid flötets nedsjunkning glider i en skena (4). Denna skena är försedd med fyra kontakter på 1 cm avstånd från varandra. Vilken som helst av kontakterna kan bli strömförande genom ett 6 V ficklampsbatteri. Kommer släpbygeln i beröring med en sådan strömförande kontakt sätts ett elektriskt stoppur i gång och stängs av igen när bygeln berör nästa kontakt. Mätsträckan kan godtyckligt varieras genom att två kontakter på det önskade avståndet görs strömförande. På detta sätt kan man lätt anpassa mätningarna efter omständigheterna. För att göra det möjligt att göra flera

mätningar på samma ställe utan att bryta förbindelsen mellan apparat och prov har man satt in en ventil (6). Denna är placerad vid basen av det luftrör som står i förbindelse med jordprovet. Genom att öppna ventilen kan man återställa flötet i utgångsposition för följande mätning.

Den provbehållare (7) för fältundersökningar som finns på apparaten är gjord så, att den kan slås ner i jorden endast till ett bestämt djup. På så sätt får man samma G-värde för alla mätningar.

För laboratorieundersökningar användes stålcyllindrar med samma storlek som provbehållaren. Härigenom är det möjligt att med en gummislang koppla ihop cylinder och provbehållare och utföra mätningen på vanligt sätt. Omedelbart efter provtagningen stoppas provet i en plastpåse för att förhindra vattenavdunstning under tiden mellan provtagning och mätning.

IV. Beräkningar

För att erhålla ett permeabilitetsvärde, som är oberoende av genomströmmande medium och av mätförhållandena har genomgående använts de arbetsekvationer som tidigare har berörts.

1. För mätning av prover:

$$k_{oo} = \frac{V \cdot \eta}{p \cdot t} \cdot \frac{1}{A}$$

2. För mätning i bevuxen jord:

$$k_{oo} = \frac{V \cdot \eta}{p \cdot t \cdot G}$$

V = Volym av genomströmmande luft (cm³)

p = Tryck (dyn/cm²)

η = Luftens viskositet (dynsek/cm²)

t = Tid (sek)

l = Jordprovets längd (cm)

A = Jordprovets tvärsnittyta (cm²)

G = Konstant som ersätter A/l vid mätning i bevuxen jord

Av dessa storheter finns V, p och G tabulerade (Kmoch 1961). Viskositeten är starkt temperaturberoende och får därför beräknas för varje mättillfälle. Därvid gäller för vattenmättad luft enligt Tanner och Wengel (1957)

$$\eta = [185 - 0,49 (26 - X)] \cdot 10^{-6} \text{ g cm}^{-1} \text{ sek}^{-1}.$$

För att kunna beräkna detta värde måste temperaturen, X i grader Celsius, mätas omedelbart ovanför vattenytan i permeameteren.

Den statistiska behandlingen av de vid mätningarna erhållna resultaten är begränsade. Arbetets omfång och målsättning motiverar inte en mer ingående statistisk analys. Spridningen av värden vid mätning av luftpermeabiliteten är ofta mycket stor. Enligt undersökningar av bl.a. Kirkham et.al. (1959) följer luftpermeabiliteten en normal logaritmisk fördelning. Därför är ett geometriskt medelvärde av luftpermeabilitetsvärdena mer meningsfullt än ett aritmetiskt medelvärde. För att se hur geometriskt och aritmetiskt medelvärde varierar, kan man räkna ut medelvärdena av tre värden som representerar en vanlig spridning vid luftpermeabilitetsmätning:

$0,1 \mu^2$; $1,0 \mu^2$ och $10,0 \mu^2$. Det aritmetiska medelvärdet blir $3,70 \mu^2$ medan det geometriska blir $1,00 \mu^2$.

Eftersom man enklast erhåller det geometriska medelvärdet genom att räkna ut det aritmetiska medelvärdet av de numeriska värdenas logaritmer, är det lämpligt att som grund för klassifiering m.m. av luftpermeabilitet genomgående använda logaritmer (pK_{O_2}).

De värden på spridningen som är uträknade i vissa av tabellerna är att betrakta som de gränser inom vilka ett mätvärde kommer att falla med 95 % sannolikhet (konfidensintervallet = 0,05). Det är således inte det vanligen brukade medelfelet som har använts.

V, Försök1. Försök i bevuxen jord med olika packningsintensiteter.

På avdelningen för jordbearbetning pågår sedan flera år undersökningar av hur jordens packningsgrad inverkar på grödans utveckling. I ett försök studerar man hur såtiden kombinerad med olika packningsintensiteter medverkar till skillnader i utvecklingsgraden (Fergedal 1966). Vissa led av detta försök undersöktes med avseende på skillnader i luftpermeabilitet.

Packning - såtidförsöket är förlagt dels på en styv lera och dels på en lerig mojord. På grund av stark torka vid mätningstillfällena kunde av praktiska skäl mätningar endast göras på den lättare jorden. Kornstorleksfördelningen i jorden är återgiven i figur 2.

De såtider som förekommer i försöket betecknas som T-led, M-led, N-led och A-led. T-leden sås så fort det går att någorlunda bruka jorden, upptill en månad före normalt vårbruk. M-leden sås vid en tidpunkt mitt emellan tidig och normaltidig sådd, c:a 2 veckor före normalt vårbruk. N-leden sås när vårbruket i allmänhet påbörjats i trakten. A-leden sås när tjälen endast försvunnit i ytlagret, d.v.s. ett par månader före normal sådd (Fergedal 1965). Luftpermeabiliteten mättes på T- och N-leden.

Packningsintensiteterna betecknas som 0-led, 1-led och 2-led. 0-leden får ingen packning. 1-leden packas med traktor, som har enkla bakhjul och relativt högt lufttryck i däcken ($1,5 \text{ kg/cm}^2$). 2-leden packas med traktor, som har dubbla bakhjul och lågt lufttryck i däcken ($0,3 - 0,4 \text{ kg/cm}^2$). Bakaxeltrycket är dock lika stort som vid packning med enkla bakhjul (Fergedal 1965). Mätning av luftpermeabiliteten gjordes på samtliga packningsintensiteter.

Försöket var vid mättillfällena sätt med vårvete. Mätningarna utfördes under tiden mellan axgång och mognad. Proven togs inom en begränsad yta av parcellen, där jorden var så homogen som möjligt med avseende på packning och jordart. Endast ett djup i profilen undersöktes, nämligen från bearbetningsbotten och 4 cm nedåt (provbehållarens djup). Ojämnheter i undersökningsytan jämnades ut, så att samma djup hela tiden kunde erhållas.

För att få jämförelsevärden mättes porvolymen på samtliga parceller enligt Andersson och Håkansson (1963). Även vridmotståndet, som också ger en uppfattning om packningsgraden i jorden, uppmättes.

Resultaten är sammanförda i tabell 1, som ger en översikt av packningsförhållandena i ifrågavarande jord. Som väntat visar alla mätmetoder den starkaste packningen i T_1 -ledet, och den svagaste i 0-ledet. De packningsintensiteter som ligger mellan dessa båda extremvärden är något svårare att teoretiskt uppskatta. Graden av packning är ju lika i samtliga 1- resp. 2-led, men utförd vid olika vattenhalt. T_1 och N_1 samt T_2 och N_2 bör därför med stor sannolikhet visa att porositetsförhållandena är sämre i de tidigast packade leden. Likaså måste givetvis 1-leden visa en sämre porositet än 2-leden. Resultaten verifierar fullständigt dessa antaganden. Vid jämförelse mellan T_2 och N_1 är det omöjligt att dra några teoretiska slutsatser. Mätningarna visar också varierande resultat. Porvolymen är klart högst i N_1 , 2,6% högre än i T_2 . Vridmotståndet är lägre i N_1 , och visar således i likhet med porvolymen, att packningsgraden är högre i T_2 . Det föreligger dock ingen signifikant skillnad mellan vridmotstånd i T_2 och N_1 . I motsats till dessa resultat visar mätningarna av jordens genomsläpplighet för luft att permeabiliteten är högre i T_2 än i N_1 . Givetvis kan detta bero på en tillfällighet t.ex. mätningar på olika delar av parcellen. Värdena på luftpermeabiliteten visar dock vid en variansanalytisk beräkning att samtliga led skiljer sig från varandra med 95% sannolikhet. Luftpermeameteren är ett mycket känsligt instrument, som teoretiskt bör kunna visa skillnader där annan apparatur icke förmår lämna entydiga uppgifter.

Vid alla mätningar av luftpermeabiliteten måste stor hänsyn tas till vattenhalten i jorden vid måttillfället. Det är ju alldeles klart att om förhållandet luft - vatten förändras i porsystemet, måste även hastigheten av ett genomströmmande luftflöde förändras. Tabell 2 visar storleken av denna förändring i de olika leden av packningsförsöket. Mätningarna är gjorda dels i extremt urtorkad jord ($w = 10 - 12\%$) och dels vid ungefär fältkapacitet ($w = 28 - 30\%$). På parceller med låg porositet kan, som synes, permeabilitetsskillnaden bli upp till tio enheter. Att skillnaden blir mindre på parceller med hög porositet beror på att man här har en större andel "luftförande" porer som vid fältkapacitetens inställande snabbt töms på vatten.

Det är således nödvändigt att ha ungefär samma vattenhalt i luftpermeabilitetsproven om de skall kunna jämföras. Kravet är dock inte större än $\pm 2\%$. Vid dessa skillnader i vattenhalt har inte några signifikanta avvikelser i luftpermeabiliteten kunnat påvisas.

Teoretiskt är det lockande att konstruera ett empiriskt samband mellan vattenhalt och luftpermeabilitet i form av en kurva. Praktiskt visar det sig dock vara förenat med betydande svårigheter att få fram denna kurva, så att den med rimlig grad av säkerhet visar de riktiga förhållandena.

Vid praktiska och orienterande undersökningar av luftpermeabiliteten är det en fördel om man lätt kan utvärdera jorden och placera den i en bestämd klass. Kmoch och Hanus (1965) har föreslagit den klassindelning som är uppsatt i tabell 3. I detta förslag klassar man dock inte jorden efter medelvärdet av ett antal parallellmätningar, utan inordnar provet i den klass som förekommer talrikast vid mätningarna. Denna metod är naturligtvis utmärkt att använda för utvärdering vid fältmätningar på ort och ställe. Tidsåtgången reduceras väsentligt. För forsknings- och försöksarbete, då större krav på noggrannhet eftersträvas, är det emellertid lämpligare att arbeta med geometriska medelvärden.

Den ovan angivna klassindelningen bör, för att kunna vara användbar, anpassas till de speciella förhållanden som råder vid mätplatsen. Sådana saker som jordart, klimat m.m. inverkar i så hög grad att någon generell klassindelning måste bli mycket osäker. För den lokal som undersökts i detta försök bör den klassindelning, som föreslås i tabell 4 ganska väl avspegla de faktiska permeabilitetsförhållanden som råder här.

2. Jämförelse mellan lucker och packad jord i två olika jordarter.

Lerhalten i jorden inverkar i hög grad på de effekter en packning vid hög vattenhalt medför. En jord med hög lerhalt blir vid en sådan packning betydligt mer förtätad än den lerfattiga jorden. Detta medför en förändring i jordens fysikaliska egenskaper som i många fall leder till en betydande försämring av grödans utveckling. Så kan t.ex. den minskade andelen av tvärgående sprickor och lufthållande porsystem öka det mekaniska motståndet för rötternas nerträngande. Även rötternas gasutbyte kan påverkas av den ökade förtätningen (Fergedal 1963). För att få en uppfattning om hur olika jordarter förhåller sig till en sådan ändring i fysikaliska faktorer förefaller det lämpligt att förutom porositetmätning även mäta luftpermeabiliteten. Porositeten i en jord med hög lerhalt är högre än i en lerfattig, varför det knappast går att göra en jämförelse mellan olika jordarter med avseende på vilken som är bäst eller sämst i fysikalisk bemärkelse. Vid mätning av luftpermeabiliteten fås däremot, enligt Kozeny-Carman sambandet,

k_{00} som funktion av porvolymen. Man erhåller således ett mätvärde som är beroende av markens porositet och skulle alltså vara en lämplig faktor att använda vid jämförelse mellan olika jordar.

Mätningarna i detta försök är gjorda på ett luckert och ett starkt packat led dels på en styv lera och dels på en molättlera. Kornstorleksfördelningen visas i tabell 5. Jordarna var sådda med korn och provtagningarna gjordes mellan axgång och mognad. Endast jordlagret strax under bearbetningsbotten undersöktes.

Tabell 6 visar de resultat som har erhållits. Ur dessa kan mycket klart utläsas de ganska stora permeabilitetsskillnader som finns dels mellan olika packningsled och dels mellan olika jordarter. Det extremt låga värdet på det styva lerans packade led visade sig också i den mycket dåligt utvecklade grödan. På lättleran var permeabilitetsvärdet vid motsvarande packningsgrad cirka 7 ggr högre. Grödan var här i stort sett normalt utvecklad. En korrelation mellan faktiska förhållanden och mätvärden erhålles således genom att mäta luftpermeabiliteten. Porvolymen ger jämförbara värden på leden inom samma försök, men obrukbara resultat vid undersökning av olika jordarter.

I försök 1 behandlades en del om hur stor inverkan jordens vattenhalt har på resultatet vid en luftpermeabilitetsmätning. Vid en jämförelse mellan olika jordarter är det givetvis mycket svårt att göra mätningarna vid samma vattenhalt. De olika jordarnas vattenhållande förmåga skiftar så mycket, att om samma vattenhalt eftersträvades, skulle flera fysikaliska förändringar ske i jorden. Vid mätningar är det därför lämpligt att välja ett tillstånd när jordens fysikaliska egenskaper är tämligen oberoende av den totala vattenhalten. Ett sådant tillstånd kan anses föreligga vid fältkapacitet.

3. Undersökning av oregelbundenheter i utveckling hos höstrybs. Praktisk fältmätning.

Metodens användbarhet för praktiska ändamål demonstreras i följande försök. I ett fältförsök där direktsådd av höstrybs i betesvall undersöktes, uppstod ett par veckor efter uppkomst klart markerade oregelbundenheter i utvecklingen. Oregelbundenheterna var av två slag. På de jämförelseparceller som hade fått konventionell eller begränsad bearbetning före sådd var vissa sårader betydligt sämre utvecklade än de övriga. De dåligt utvecklade raderna återkom regelbundet (bild 3). En annan typ av oregelbundenhet uppträdde i

de direktsådda parcellerna. Här framkom fläckvis mycket dåligt utvecklade partier (bild 4).

För att undersöka om orsaken till dessa olikheter i utveckling berodde på fysikaliska skillnader i jorden, uppmättes luftpermeabiliteten och vridmotståndet i de olika leden. På de fläckvis återkommande dåligt utvecklade delarna togs dessutom jordprov som analyserades med avseende på kväveinnehåll. Analysen utfördes av kemiska stationen i Örebro.

I tabell 7 är upptagna de mätresultat som erhöles vid undersökning av de olika utvecklade såraderna. Samtliga mätningar är gjorda mitt i såraden. Båda de här använda mätmetoderna visar att skillnader i jorden i fysikaliskt avseende föreligger. Vridmotståndsmätningarna skiljer sig dock inte signifikant från varandra. Signifikans föreligger däremot mellan de olika raderna vid mätningen av luftpermeabiliteten. Att det verkligen är fråga om fysikaliska skillnader, bekräftas också av det faktum, att det vid bearbetningen har uppkommit en packning av jorden av traktorhjuln. De intervallvis återkommande sämre raderna förklaras genom detta.

De fläckvis förekommande oregelbundenheterna i de direktsådda parcellerna var betydligt svårare att fysikaliskt förklara. Mätresultaten som är sammanförda i tabell 8 visar också att det inte finns några skillnader, varken vad gäller luftpermeabilitet eller vridmotstånd. Förklaringen till utvecklingsskillnaderna lämnades av kväveanalyserna. Huvuddragen av analysresultaten finns i tabell 9, som visar att de bättre utvecklade partierna innehöll ett större kväveförråd än de sämre. Orsaken till detta berodde sannolikt på olikheter i den botaniska sammansättningen i den förutvarande betesvallen.

Ovanstående undersökningar visar hur det är lämpligt att använda luftpermeameteren i praktiskt bruk. Genom ett relativt litet antal mätningar erhålles ett mått på jordens fysikaliska beskaffenhet, och erforderliga åtgärder kan vidtagas. I det här försöket kunde man tämligen lätt konstatera att det inte fanns några fysikaliska skillnader i de oregelbundna direktsådda parcellerna. Det ligger då nära till hands att anta, att fläckigheten beror på brist av ett för oljevaxter så begärligt växtnäringsämne som kväve.

4. Laboratorieundersökningar

I många fall är det fördelaktigt att ta ut jordprov vid försöksplatsen och göra de fysikaliska undersökningarna i laboratoriet. Detta är enda möjligheten bl.a. när flera olika mätningar skall göras på samma prov.

Även om luftpermeameteren främst är avsedd för bruk ute på fältet går det utmärkt att använda den för laboratorieundersökningar. Metodiken härvid är tidigare beskriven.

I detta försök är prov tagna på packad ($1,5 \text{ kg/cm}^2$) och lucker styv lera resp. molättlera (tabell 5) vid en vattenhalt ungefär motsvarande de olika jordarnas fältkapacitet. Samtidigt med mätning av luftpermeabiliteten, mättes också porositeten med en porosimeter beskriven av Torstensson och Eriksson (1936). Resultaten är upptagna i tabell 10, där samtliga mätresultat har medtagits. Genom detta erhålles en jämförelse mellan luftpermeabilitet och porositet för de enskilda mätningarna. Följdsamheten är som synes ganska stor. Spridningen av värdena på luftpermeabiliteten är lika stor som i tidigare försök. Medelvärdena visar de mycket stora skillnader som råder mellan ett packat och luckert led. Särskilt anmärkningsvärt är det extremt höga värdet på den styva lerans luckra led. Jorden hade här en mycket god struktur närmast av "grynig" karaktär. Det packade ledet utgjordes däremot av mycket små aggregat, sammankletade till större enheter. Denna betydligt sämre struktur gav också ett mycket lågt värde på luftpermeabiliteten. Strukturför-sämringen visade sig också i porositeten, där det luckra ledet hade cirka 20 % större porvolym än det packade. Även lättleran visade en stor skillnad i luftpermeabilitet mellan packat och luckert led. Så låga resp. höga värden som i den styva leran erhöles dock inte. Förklaringen till detta måste ligga i lerhaltens inverkan. Vid packning blir det inte samma förtätning av jorden vid mindre lerhalt. En lucker lätt-lera har en högre grad av enkel-kornstruktur än en styv och är således mindre aggregerad. Porositetsskillnaden mellan packat och luckert led i lättleran är i likhet med den styva leran också ca 20 %. Att skillnaden i luftpermeabilitet ändå är mindre visar att lättleran har en större specifik yta, d.v.s. är mindre aggregerad. Laboratorieundersökningar av luftpermeabiliteten visade sig vara en enkel och mycket snabb metod att mäta en fysikalisk faktor på ett jordprov. Vid intagning av jordprov för olika fysikaliska undersökningar kan man således på detta sätt snabbt erhålla värdefulla kompletterande upplysningar om jorden.

5. Luftpermeabilitetens variation inom en begränsad yta.

Vid mätning av luftpermeabiliteten i fält tas provupprepningarna inom ett relativt begränsat område, ca 5 m², av det led som skall undersökas. Ofta erhålles då en ganska stor spridning mellan de enskilda mätningarna, vilket har framkommit av tidigare beskrivna undersökningar. I en del fall är spridningen så stor att det vid ett litet antal upprepningar är svårt att få signifikanta värden. Vid en undersökning av jordpackning av Adams & Blake (1960) erhöles genom luftpermeabilitetsmätning ingen signifikant skillnad mellan packad och opackad jord, även om medelvärdena skiljde sig från varandra med fyra enheter.

Den stora spridningen är givetvis en mätteknisk nackdel, men samtidigt visar den metodikens känslighet. Ett så heterogent medium som jord varierar naturligtvis oerhört mycket vad gäller porositet och andra fysikaliska mätvärden även inom ett begränsat område. Också små skillnader blir märkbara vid luftpermeabilitetsmätning. Ett fotsteg ger en tydlig skillnad i luftpermeabilitet. För att ytterligare belysa variationen inom en mycket begränsad yta gjordes följande undersökning.

Provtagningarna gjordes på leden M₁ och M₀ i det tidigare beskrivna packning-såtidsförsöket (Fergedal 1965) på en lerig mojord (fig. 2). På parcellerna valdes slumpvis en yta med dimensionerna 54x54 cm (0,29 m²), där 36 prov uttogs med stålcyllindrar med diametern 5,6 cm. Avståndet mellan stålcyllindrarna var 4 cm (fig. 3).

Innan stålcyllindrarna slogs i jorden var det övre lösa lagret av markytan borttaget och bearbetningsbotten tilljämnd. Islagningen av cyllindrarna skedde med yttersta försiktighet, så att inga sprickbildningar uppstod. När proven tagits upp placerades de i plastpåsar. Mätningarna gjordes i laboratoriet enligt tidigare beskriven metod vid den vattenhalt som fanns i jorden vid provupptagningen. Proven sattes därefter på en fuktig bädd så att hela det kapillära systemet vattenmättades, och mätningarna av luftpermeabiliteten upprepades.

De resultat som erhöles är redovisade i tabell 11, 12 och 13. I tabell 11 och 12 finns primärvärdena för försökets olika led upptagna, och tabell 13 visar en sammanställning. Primärvärdena i tabellerna är uppsatta på den plats av nätytan där provet är taget. Variationen i luftpermeabilitet är som synes stor även inom denna begränsade yta. På den luckra rutan varierar värdena mer än på den packade, vilket ju också är ett resultat som kan ges en tänkbar förklaring. På de luckra parcellerna bearbetas det övre jordlagret

på våren, medan jorden under bearbetningsbotten blir relativt opåverkad av vårbruket. Den heterogena struktur som erhållits genom vinterns tjälning och genom växternas rotsystem bibehålles. De packade parcellerna genomgår däremot en djupgående packningsprocedur på våren, vilket förlänar jorden en högre grad av homogenitet.

Vid mätning av luftpermeabiliteten passerar luften i första hand genom de större luftförande porerna i andra hand genom det kapillära porsystemet i den mån detta inte är vattenmättat. Om de kapillära porerna helt blockeras genom en maximal vattenuppsugning av provet blir halten luftförande porer helt avgörande för storleken av permeabilitetskonstanten. Tabellerna visar att efter en sådan vattenmättnad blir permeabiliteten i medeltal lägre än i motsvarande prov av lägre vattenhalt. I vissa fall blir dock permeabiliteten lika eller högre i det vattenmättade provet. Orsaken till detta torde bero på, att en eller ett par genomgående luftförande porer svarar för värdet på luftpermeabiliteten. De högre värdena kan ha uppkommit genom att en delvis genomgående luftförande por bryts upp av luftens tryck när alternativa vägar för passagen försvinner. Som framgår av tabellerna är detta främst markerat på den luckra ytan.

Att ett fåtal luftförande porer helt kan bestämma luftpermeabiliteten i ett prov är ett av denna metods största nackdelar. Visserligen är ett stort antal luftförande porer, t.ex. maskhål, ett mått på att jorden har goda fysikaliska och kemiska egenskaper, men risken är att man genom detta får ett för högt permeabilitetsvärde. Vid ett stort antal mätningar får dock extremvärden liten betydelse och det geometriska medelvärdet ger ett relativt säkert mått. Ett sätt att minska antalet mätningar och ändå få ett representativt värde, vore att använda en provbehållare med större yta än den som nu användes (25 cm^2). Detta skulle dock innebära att apparaturens övriga dimensioner också måste ändras. Den praktiska apparaten för fältmässigt bruk som man nu har skulle alltså bli betydligt mer otymplig att arbeta med.

6. Verifiering av Kozeny - Carman - ekvationen.

Som framgått av tidigare försök finns ett klart markerat samband mellan porositet och luftpermeabilitet. Hur detta samband skall uttryckas matematiskt är inte fullt klart, Den ekvation som kommer närmast är den tidigare beskrivna Kozeny - Carman - ekvationen, även om dess giltighet ofta är kritiserad. Den största inskränkningen är att ekvationen inte tar hänsyn till storleksfördelningen av porerna. Bayer (1938) föreslog därför att de olika porstorleks-

grupperna skulle multipliceras med empiriska faktorer - ett tillvägagångssätt som är mycket svårt att praktiskt utnyttja. Det som inte går att förklara med en sådan här ekvation är den kraftiga ökningen av permeabiliteten under inverkan av strukturbetingade porer. Den totala porvolymen har oväsentlig inverkan på denna höjning. För att pröva användbarheten av Kozeny - Carman - ekvationen måste jordpartiklarnas specifika yta, O/V , bestämmas. En sådan bestämning fordrar inte bara att hänsyn tas till olika former utan också till storleksfördelningen av de i systemet ingående partiklarna. En beräkning på sådana grunder är omöjlig att göra. Vid en teoretisk uppskattning måste därför partiklarna approximeras till en idealform, t.ex. klotform. De olika storlekarna kan uttryckas som det geometriska medelvärdet av samtliga partikelstorlekarna (Kmoch 1961). En viktig fråga är vilken typ av partiklar eller komponenter som bestämmer den specifika ytan. För grövre material användes generellt kornstorleksfördelningen. För finkorniga jordar visade Lambe (1954) att teoretiska beräkningar som med Kozeny - Carman - ekvationen endast har begränsat värde, då här jämte kornstorleken även andra viktiga faktorer, framför allt jordens struktur, spelar stor roll.

På dessa grunder gjorde Kmoch (1961) beräkningar av luftpermeabiliteten med hjälp av Kozeny - Carman - ekvationen. Som värde på specifik yta, O/V , använde han som jämförelse dels beräkningar med utgångspunkt från kornstorleken och dels från aggregatstorleken, i båda fallen uttryckt som geometriskt medelvärde, G.M. För den jord han använde blev G.M. för primärpartiklarna 0,0037 mm och G.M. för aggregaten 0,633 mm. Som värde på f i ekvationen användes inte den totala porvolymen utan procenten luftporer. Resultaten är återgivna i tabell 14. Av denna framgår att rangordningen mellan mätt och beräknat k_{00} -värde ganska väl stämmer överens. Den absoluta storleken av värdena skiljer sig dock mycket mellan de olika beräkningsmetoderna. Bestämmas permeabiliteten med hjälp av kornstorleksfördelningen erhålles alltför små värden. Å andra sidan blir de värden som beräknats med aggregatstorleken som grund avsevärt högre än de mätta.

Egna undersökningar bekräftar i stort dessa resultat. Vid beräkningen av O/V utgicks här ifrån dels kornstorleksanalyser utförda vid avdelningen för jordbearbetning och dels aggregatstorleksanalys i form av torrsällning. De jordar som undersöktes var styv lera och molättlera. Det enda som avvick från Kmochs undersökningar var att permeabiliteten beräknad med aggregatstorleken som grund blev genomgående högre.

Undersökningarna tyder på att den specifika ytan inte enbart kan beräknas med utgångspunkt antingen från kornstorleken eller aggregatstorleken, utan från ett värde som ligger mellan dessa båda. Detta mellanvärde tenderar i föreliggande fall ligga betydligt närmare aggregatstorleken än kornstorleken. Utav detta kan slutas, att strukturen är en viktigare permeabilitetsbestämmande faktor än kornstorlekssammansättningen eller texturen.

Vid de ovan beskrivna beräkningarna betecknade f i Kozeny - Carman - ekvationen procenten luftporer istället för den totala porvolymen. Detta förfarande är riktigt beroende på att Kozeny - Carman - ekvationen gäller för torrt material. Men även om porositeten ersättes med volymen luftfyllda porer kan det uppstå komplikationer genom den andel tillslutna, luftfyllda tomrum som finns i jorden. Permeabiliteten skulle sålunda gälla för den "effektiva" volymen luftfyllda porer. Denna effektiva volym går knappast att mäta direkt, eftersom en porosimetermätning kommer att innefatta åtminstone en del av de luftfyllda tomrummen. Fastän förhållandet i luftpermeabilitet mellan ett vått och torrt prov från samma jord skulle kunna ge upplysningar om halten tillslutna porer måste en annan, oberoende mätning göras för att denna upplysning skall kunna erhållas. Fuktigheten kommer ju att ta de minsta porerna i besittning. Sålunda måste den specifika ytan vara olika för våta och torra prov. (Janse och Bolt 1960).

Med detta som grund gjordes ett försök för att studera permeabilitetens förhållande till porositeten i våt respektive torr jord. Tio stålcyllindrar av samma storlek preparerades med en lättlera med bestämd aggregatfraktion (1-2 mm). Vattenhalten var ungefär lika i alla proven, vilket kunde regleras genom att vatten tillsattes de torra aggregaten. Porositeten i proven varierades genom att olika mängder jord packades ner i cylindrarna med hjälp av en vibrator. Efter att luftpermeabiliteten hade mätts torkades proven mycket försiktigt för att i möjligaste mån undvika en förstöring av den ursprungliga por-sammansättningen. Luftpermeabiliteten mättes därefter på de torra proven.

De resultat som erhöles vid dessa mätningar är uppsatta i tabell 15. Vid tolkningen av skillnaderna mellan vått och torrt prov är det lämpligt, med hänsyn till vad tidigare sagts, att hänföra dessa värden till volymen luftfyllda porer. Ett intressant sätt att presentera skillnaden är att avsätta k_{00} -värdena som funktion av Kozeny - faktorn E ($= \frac{f^3}{(1-f)^2}$, där f = luftfylld porvolym). En sådan kurvas derivata är då ett mått på den specifika ytan och på förekomsten av tillslutna porer. I fig. 4 är luftpermeabilitets-

värdena för våta resp. torra prov avsatta mot de olika E-värdena. En tydlig skillnad i de båda kurvornas lutning är märkbar. Den större lutningen för de våta proven kunde väntas, eftersom vattnet tillsluter de minsta porerna, och således ändrar storleksfördelningen av hela det luftfyllda porsystemet och ökar den specifika ytan. Å andra sidan borde förekomsten av tillslutna luftporer minska kurvans lutning. Utan andra mätningar kan man av detta dra den slutsatsen, att om det i de prov som studerades här fanns några tillslutna luftporer, var effekten av dem fullständigt överskuggad av ökningen i effektiv porstorlek.

Slutligen kan sägas att luftpermeabilitetsmätning tycks vara en enkel och känslig metod till hjälp att karaktärisera porförhållandena i jorden. Även om det kan vara svårt att kvantitativt tolka resultaten ger luftpermeabiliteten värdefulla informationer om den används i anslutning till andra metoder, som är lämpliga för undersökningar av porositeten.

VI. Sammanfattning

Uppsatsen behandlar teorin, metodiken och användbarheten för en markfysikalisk mätmetod - bestämning av jordens luftpermeabilitet. Avsikten är att ge en uppfattning om vilka möjligheter som finns att tillämpa metoden inom den praktiskt inriktade markfysikaliska forskningen. Ett grundproblem vid allt agronomiskt arbete är att kunna isolera meningsfulla faktorer ur ett faktorskomplex, som t.ex. fysikaliska mätningar av jorden ger. Genom att mäta luftpermeabiliteten och tillsammans med denna undersöka andra faktorer finns det möjlighet att objektivt värdera en jord.

Som mätvärde för jordens permeabilitet har återgetts en härledning av konstanten k_{00} (Zunker 1938), som är teoretiskt oberoende av den använda apparaturen och det genomflytande mediet. Som benämning på detta mätvärde har föreslagits "permeabilitetskonstant" eller "jordens permeabilitet" (Soil Science Society of America 1952). En apparat utvecklad av Knoch (1961) för mätning av denna konstant har beskrivits. Vidare har återgetts de ekvationer som för praktiska ändamål är lämpliga att använda för beräkning av k_{00} .

Försök 1 behandlar en undersökning som är gjord i ett packningsförsök. De fysikaliska mätningarna som gjordes var, förutom permeabilitetsmätning, bestämning av porvolym och vridmotstånd på olika hårt packade led. Samtliga mätmetoder visade entydiga resultat utom i ett fall, där porvolymen och vridmotståndet visade motsatt i förhållande till luftpermeabiliteten. En tänkbar förklaring är att man i luftpermeameteren har ett känsligare instrument. Signifika skillnader förelåg mellan luftpermeabilitetsmätningarna men inte mellan vridmotståndsmätningarna. I försöket behandlades också hur jordens vattenhalt påverkar mätresultaten. Ett försök till klassindelning av jorden med avseende på luftpermeabiliteten är föreslagen.

Olika jordarter förhåller sig på olika sätt till yttre påverkan. Försök 2 behandlar de resultat som erhållits vid jämförelse mellan två jordarter som fått samma bearbetning. Luftpermeabiliteten i en styv lera är lägre än i en molättlera. Dessutom är skillnaden mellan packad och lucker jord större i den styvare leran. Permeabilitetsmätning ger meningsfulla värden, som teoretiskt går att förklara, eftersom de stå i direkt beroende av porositeten.

Hur metoden går att använda i praktiken, t.ex. för att förklara ojämnheter i en grödas uppkomst, visas i försök 3. Fysikaliska skillnader i jorden kunde i ett fall påvisas med hjälp av luftpermeabilitetsmätning. I ett annat fall kunde på samma sätt konstateras att inga skillnader i fysikaliskt avseende förelåg. En kväveanalys påvisade här skillnader i kväveförrådet.

Luftpermeabiliteten kan även mätas laboratoriemässigt, som beskrives i försök 4. Packat och luckert led av styv lera resp. molättlera undersöktes. Porositeten mättes med en porosimeter enligt Torstensson och Eriksson (1936). Även om mätvärdena skiljer sig från fältmätningen på samma jordar erhålles analoga resultat.

Jordens heterogenitet gör att en så känslig metod som luftpermeabilitetsmätning ger en stor spridning av mätvärdena. Försök 5 visar att även inom en liten yta ($0,29 \text{ m}^2$) är spridningen stor. Undersökningen gjordes på en lerig mojord där ett packat och ett luckert led studerades. Spridningen var större på den luckra rutan. Efter vattenmättnad av proven blev permeabiliteten i medeltal **lägre**. I en del fall var dock permeabiliteten lika eller högre i det vattenmättade provet, vilket är mest framträdande i prov från den luckra ytan.

Sambandet mellan porositet och permeabilitet diskuteras i försök 6. Kozeny - Carman - ekvationens giltighet samt den häri ingående specifika ytan O/V , undersöktes. För torra grovkorniga jordar gäller ekvationen, medan den för finkorniga, aggregerade jordar har begränsat värde. Av denna anledning beräknades k_{00} med hjälp av Kozeny - Carman - ekvationen där specifika ytan uträknats dels med utgångspunkt från kornstorleksfördelningen och dels från aggregatstorleksfördelningen. I jämförelse med de mätta värdena låg de beräknade i första fallet betydligt under och i andra fallet över. Det rätta värdet på specifika ytan ligger således någonstans mellan de båda storleksfördelningarna.

I försöket diskuterades vidare hur porstorleksfördelningen inverkar på luftpermeabiliteten. En metod presenteras som visar att specifika ytan är olika för samma prov i vått och torrt tillstånd. Avsättes k_{00} mot Kozeny - faktorn E i ett diagram, fås den specifika ytan som derivatan av den erhållna kurvan. Förekomsten av tillslutna luftporer tycks inte påverka kurvans lutning i någon nämnvärd grad.

Tabell 1.

Mätresultat från försök 1.

Led	Luftpermeabilitet			Por-volym (%)	Vridmotstånd
	$k_{oo} 1)$ (mikron ²)	$pk_{oo} 1)$	Antal upprep- ningar		
O	$20,9 \pm 1,4$	$1,32 \pm 0,14$	25	53,9	270 ± 32
T ₁	$1,0 \pm 1,7$	$0,02 \pm 0,24$	25	47,4	778 ± 63
T ₂	$7,4 \pm 1,5$	$0,87 \pm 0,18$	21	50,2	529 ± 38
N ₁	$2,6 \pm 1,6$	$0,42 \pm 0,21$	20	52,8	479 ± 75
N ₂	$12,3 \pm 1,4$	$1,09 \pm 0,15$	20	53,1	311 ± 29

1) P = 0,05

Tabell 2.

Luftpermeabiliteten vid olika vattenhalt.

Led	Vattenhalt (%)	k_{oo} (mikron ²)	pk_{oo}	Δk_{oo}	$\frac{k_{oo} \text{ (låg w)}}{k_{oo} \text{ (hög w)}}$
O	10 - 12	25,7	1,41	4,8	1,23
	28 - 30	20,9	1,32		
T ₁	10 - 12	2,10	0,32	1,1	2,02
	28 - 30	1,04	0,02		
T ₂	10 - 12	19,1	1,28	11,7	2,58
	28 - 30	7,4	0,87		
N ₁	10 - 12	12,6	1,10	10,0	4,85
	28 - 30	2,6	0,42		
N ₂	10 - 12	15,8	1,20	3,5	1,28
	28 - 30	12,3	1,09		

Tabell 3.

Förslag till klassificering av luftpermeabiliteten.
(Knoch och Hanus 1965)

Klass	Genomsläpplighet	Intervall	
		pk_{oo}	k_{oo} (mikron ²)
1	mycket dålig	$< 1,00$	< 10
2	dålig	1,00 - 1,33	10 - 22
3	medelbra	1,33 - 1,67	22 - 46
4	bra	1,67 - 2,00	46 - 100
5	mycket bra	$> 2,00$	> 100

Tabell 4.

Förslag till klassificering av luftpermeabiliteten, anpassad
till resultaten i försök 1.

Klass	Genomsläpplighet	Intervall	
		pk_{oo}	k_{oo} (mikron ²)
1	mycket dålig	$< 0,50$	$< 3,2$
2	dålig	0,50 - 0,83	3,2 - 6,8
3	medelbra	0,83 - 1,16	6,8 - 14,5
4	bra	1,16 - 1,50	14,5 - 31,6
5	mycket bra	$> 1,50$	$> 31,6$

Tabell 5.

Kornstorleksfördelning av de i försök 2 undersökta jordarterna (%).
Mekanisk analys (Fergedal 1966).

Jordart	Ler ≤ 0,002	Finmjäla - 0,006	Grovmjäla - 0,02	Finmo - 0,006	Grovmö - 0,2	Sand - 2	d (mm)
Styv lera	57	10	9	8	6	0	
Molätt- lera	24	7	8	15	40	4	

Tabell 6.

Mätresultat från försök 2.

Jordart	Led	Luftpermeabilitet ¹⁾		Total porvolym (%)	Luftpor- volym (%)
		$p_{k_{0.}}$	$k_{0.}$ (mikron ²)		
Styv lera	Packat	- 0,60 ± 0,19	0,25 ± 1,55	42,7	7,8
	Luckert	0,90 ± 0,22	7,94 ± 1,66	51,1	21,5
Molätt- lera	Packat	0,26 ± 0,15	1,82 ± 1,42	37,6	8,6
	Luckert	1,31 ± 0,17	20,40 ± 1,48	42,8	16,2

1) P = 0,05

Tabell 7.

Mätresultat från undersökning av oregelbunden utveckling av höstrybs. Olika utvecklade sårader.

	Luftpermeabilitet ¹⁾			Vridmotstånd ¹⁾	
	pk _{oo}	k _{oo} (mikron ²)	Antal uppr.	(P/cm ²)	Antal uppr.
Bra rader	1,00 ± 0,25	10,0 ± 1,8	10	133 ± 34	10
Dåliga rader	0,03 ± 0,32	1,1 ± 2,1	10	182 ± 23	10

1) P = 0,05

Tabell 8.

Mätresultat från undersökning av oregelbunden utveckling av höstrybs. Ojämnheter i de direktsådda parcellerna.

	Luftpermeabilitet ¹⁾			Vridmotstånd ¹⁾	
	pk _{oo}	k _{oo} (mikron ²)	Antal uppr.	(P/cm ²)	Antal uppr.
Bra utveckling	0,59 ± 0,28	3,9 ± 1,9	12	438 ± 61	10
Dålig utveckling	0,54 ± 0,21	3,5 ± 1,6	12	437 ± 61	10

1) P = 0,05

Tabell 9.

Huvuddragen av resultaten från kväveanalys av jord från rybsförsök.
(Medelvärde av vardera 50 piov)

Bra utveckling		Dålig utveckling					
Ytlager (0-3 cm)		4-7 cm		Ytlager (0-3 cm)		4-7 cm	
Nitrat-kväve (mgN/100g)	Total-kväve (mgN/100g)	Nitrat-kväve (mgN/100g)	Total-kväve (mgN/100g)	Nitrat-kväve (mgN/100g)	Total-kväve (mgN/100g)	Nitrat-kväve (mgN/100g)	Total-kväve (mgN/100g)
5,9	457	1,7	225	2,6	373	1,3	184

Tabell 10.

Mätresultat från laboratorieundersökningar av luftpermeabiliteten.

Jord- art	Led	Luftpermeabilitet			Total porv.		Luftporv.	
		pk_{00}	k_{00} (mikron ²)	$\overline{k_{00}}$	$V_l + w$ (%)	$\overline{V_l + w}$	V_l (%)	$\overline{V_l}$
Styv lera	Packat	0,20	1,6		35,9		7,9	
		0,23	1,7		33,0		5,0	
		0,90	7,9		35,0		8,0	
		-0,52	0,3		33,6		5,6	
		0,42	2,6		35,8		8,8	
		0,30	2,0		38,1		10,9	
		1,28	19,1		40,8		13,2	
		-0,70	0,2		35,5		8,4	
		-1,00	0,1		34,4		6,3	
		-0,10	0,8		37,7		8,1	
		1,20	16,0		43,2		15,3	
		0,95	9,0	1,82	38,1	36,8	9,2	8,9
	Luckert	2,09	124,2		59,4		30,0	
		2,19	155,6		59,4		29,4	
		2,19	155,6		52,8		23,4	
		2,03	106,4		55,8		26,0	
		2,70	505,8		70,5		41,5	
		2,40	252,9		54,8		25,2	
		2,46	289,0		58,2		28,1	
		1,96	92,0		45,9		16,4	
		2,31	202,3		54,6		25,0	
		2,35	224,8		58,2		28,7	
		2,23	168,6		54,1		24,4	
		2,31	202,3	186,5	57,4	56,8	28,0	27,2

- 1) Porositetsvärdena på de båda jordarnas packade led har med den använda metode uppenbarligen blivit för låga. Sannolikt har detta berott på att jämnviktsinställelsen i det fina porsystemet har gått mycket långsamt.

Tabell 10 forts.

Mätresultat från laboratorieundersökningar av luftpermeabiliteten.

Jord- art	Led	Luftpermeabilitet			Total porv.		Luftporv.	
		pk_{00}	k_{00} (mikron ²)	$\overline{k_{00}}$	$V_1 + w$ (%)	$\overline{V_1 + w}$	V_1 (%)	$\overline{V_1}$
Molättlera	Packat	1,09	12,3		31,6		12,1	
		0,53	3,4		28,3		9,2	
		1,52	33,2		33,2		14,8	
		0,22	0,6		25,1		6,1	
		0,65	4,5		31,8		12,0	
		0,22	0,6		25,1		6,0	
		0,82	6,6		27,5		8,5	
		0,22	0,6		21,4		2,4	
		0,28	1,9		29,7		10,1	
		1,39	24,8		34,2		15,4	
		0,85	7,1		28,9		10,0	
		1,33	21,6	4,5	27,4	28,6 ¹⁾	8,4	9,6
	Luckert	1,74	54,7		41,4		22,0	
		2,31	202,3		53,9		34,7	
		1,21	16,1		41,0		22,0	
		2,31	202,3		58,7		39,6	
		2,05	112,3		53,9		35,0	
		2,40	252,9		53,1		34,1	
		2,23	168,6		44,8		25,8	
		0,92	8,4		40,5		21,5	
		2,01	101,2		47,5		28,5	
		1,51	32,1		38,7		19,7	
		2,10	126,1		45,1		26,1	
		1,03	10,8	66,1	42,1	47,2	20,1	27,4

- 1) Porositetsvärdena på de båda jordarnas packade led har med den använda metoden uppenbarligen blivit för låga. Sannolikt har detta berott på att jämnviktsinställelsen i det fina porsystemet har gått mycket långsamt.

Tabell 11.

=====

Variation i luftpermeabilitet (k_{00} mikron²) i packad ruta.Låg vattenhalt

3,6	5,1	23,5	21,5	17,6	7,3
4,2	18,4	24,7	15,6	21,1	10,3
20,2	21,5	7,6	14,9	29,8	1,0
1,4	8,5	17,5	36,1	15,6	13,6
8,2	26,6	22,0	20,0	11,0	3,3
1,8	4,1	2,7	13,3	17,0	3,3

Hög vattenhalt

1,9	1,1	15,8	7,5	26,3	2,5
2,2	16,9	14,0	9,8	15,3	10,3
4,9	36,1	5,0	8,1	59,5	0,9
0,9	2,5	18,1	81,0	14,9	3,7
2,6	31,6	23,5	15,3	12,0	0,8
0,8	0,8	0,1	0,8	14,7	0,1

Tabell 12.

Variation i luftpermeabilitet (k₀₀ mikron²) i lucker ruta.

Låg vattenhalt

101,0	72,2	134,9	33,7	36,1	112,4
77,8	77,8	38,2	5,4	101,0	67,4
202,3	126,4	8,8	252,9	51,9	63,2
101,0	44,0	183,9	168,6	134,9	30,7
155,6	134,9	84,3	224,8	202,3	46,0
72,3	56,2	6,2	40,0	155,6	119,0

Hög vattenhalt

50,8	47,0	155,6	2,9	18,4	56,2
31,1	40,5	2,5	0,4	59,5	202,3
134,9	88,0	0,6	47,0	16,4	19,6
31,6	15,8	183,9	168,6	57,8	10,0
112,4	80,9	48,2	252,9	183,9	15,9
27,0	25,9	0,1	14,7	126,4	84,3

Tabell 13.

Sammanställning av försök 5.

	Luftpermeabilitet			
	Låg vattenhalt		Hög vattenhalt	
	pk_{oo}	k_{oo} (mikron ²)	pk_{oo}	k_{oo} (mikron ²)
Packad ruta	1,00	10,0	0,70	5,0
Lucker ruta	1,86	72,5	1,46	28,8

Tabell 14.

Jämförelse mellan mätt och två uträknade värden på luftpermeabiliteten (Knoch 1961).

k_{oo} i 10^{-10} cm².

Prov nr	Luftporvolym (%)	k_{oo} mätt	k_{oo} beräknad med $O = O_A$ 1)	k_{oo} beräknad med $O = O_P$ 2)	Rangordning	
					Mätt	Beräknat
1	3,9	5,9	13,7	0,00047	10	11
2	6,2	3,7	56,5	0,00193	11	10
3	10,2	40,0	293	0,01	6	6
4	9,3	56,0	218	0,00743	5	7
5	8,8	105,0	182	0,00623	4	8
6	7,0	10,8	88,3	0,00302	9	9
7	19,9	540,0	2730	0,0935	2	1
8	17,6	409,0	1790	0,0611	3	3
9	14,7	33,0	972	0,0332	7	4
10	11,8	24,1	469	0,016	8	5
11	19,3	618,0	2460	0,084	1	2

1) O_A = Ytan av aggregaten

2) O_P = Ytan av primärpartiklarna

Tabell 15.

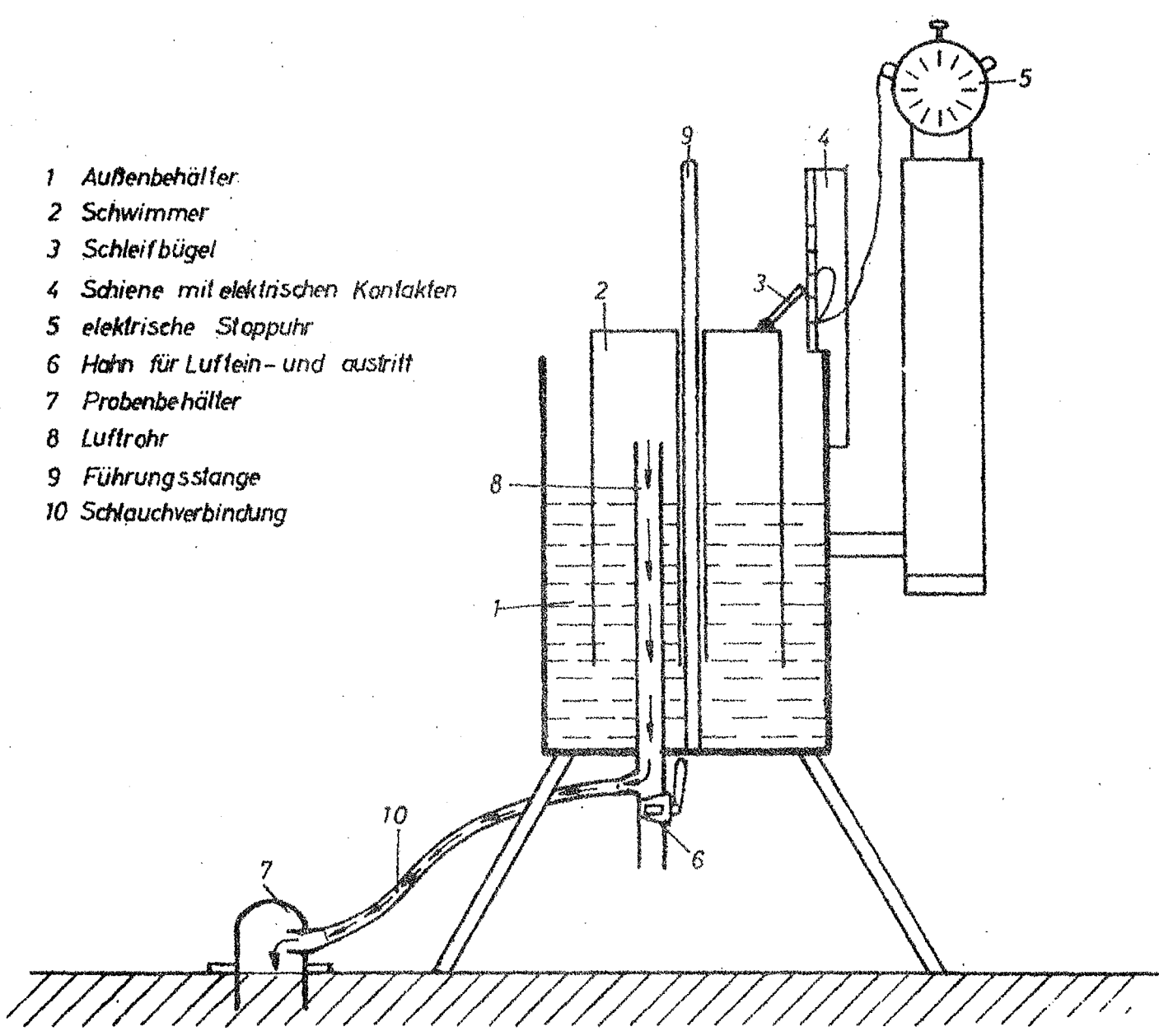
Resultat erhållna vid undersökning av luftpermeabilitetens förhållande till porositeten i våt respektive torr jord.

Prov nr	Luft- volym(%)	Vatten- halt(%)	Kozeny-faktor		Luftpermeabilitet $k_{\bullet o}$ (mikron ²)	
			vått prov	torrt prov	vått prov	torrt prov
1	2,3	20,0	7,1	24,4	0,8	2,3
2	8,5	19,0	10,9	29,6	6,5	10,4
3	9,8	19,5	12,2	31,4	7,4	18,3
4	15,1	19,8	17,4	36,3	25,3	30,4
5	19,9	19,6	21,9	41,6	33,9	45,8
6	22,4	19,8	24,5	44,0	58,7	71,0
7	24,2	19,8	26,3	46,0	70,0	104,0
8	28,5	19,6	30,6	50,2	101,2	110,2
9	34,8	19,3	37,0	56,2	112,2	123,0
10	39,6	19,2	41,8	60,9	202,1	210,1

Figur 1.

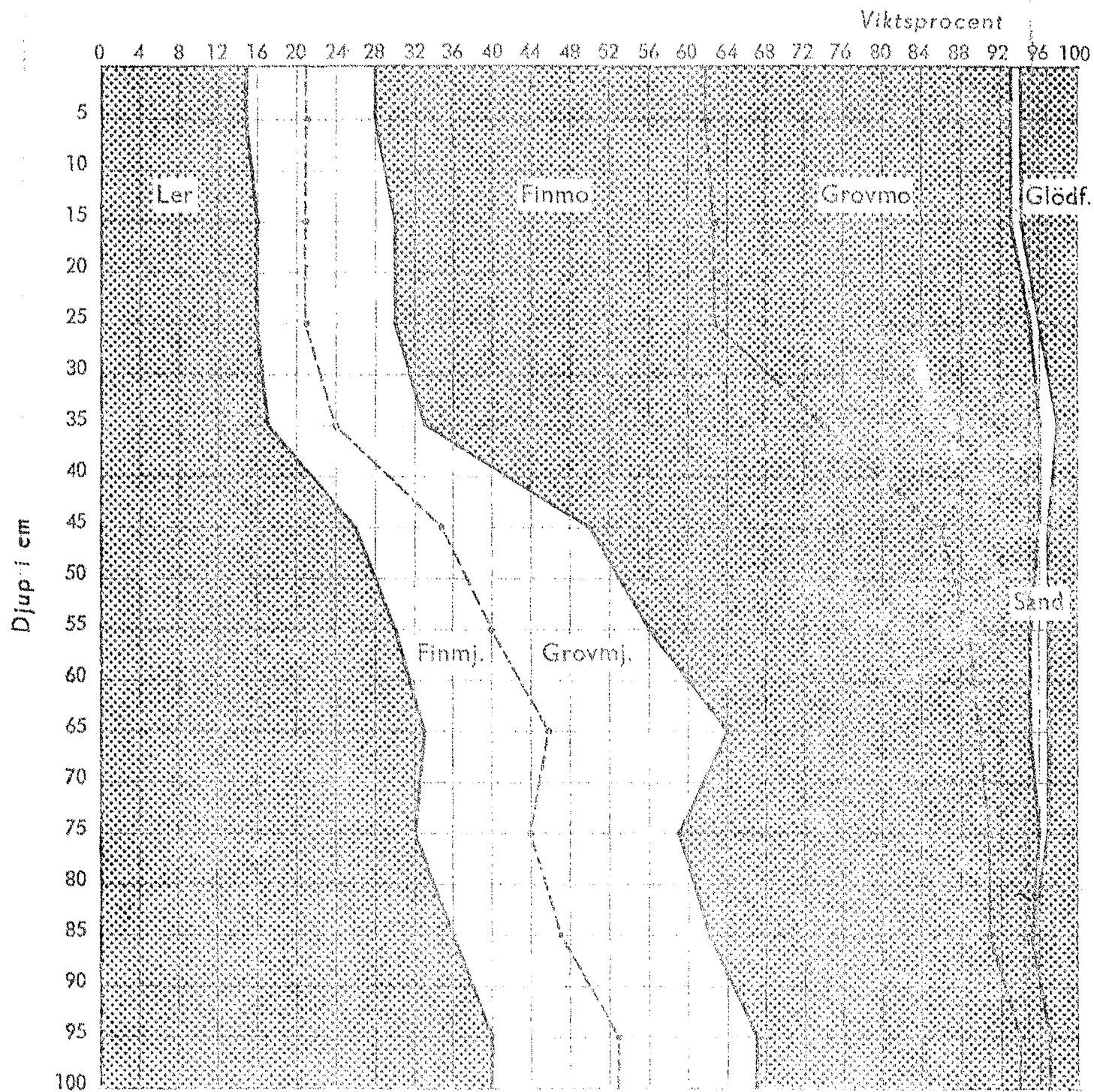
Schema des Luftpermeameters

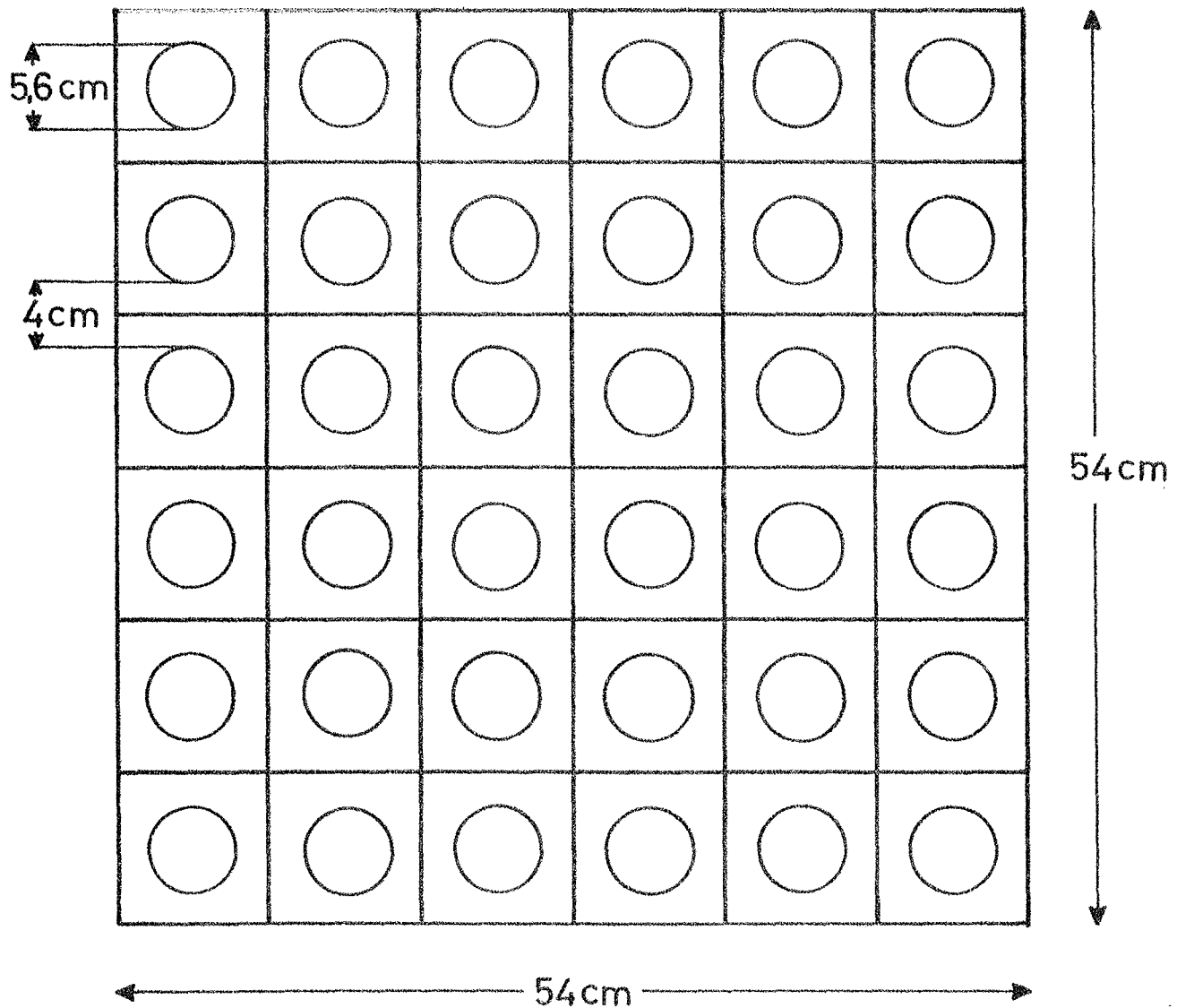
- 1 Außenbehälter
- 2 Schwimmer
- 3 Schleifbügel
- 4 Schiene mit elektrischen Kontakten
- 5 elektrische Stoppuhr
- 6 Hahn für Luftein- und austritt
- 7 Probenbehälter
- 8 Luftrohr
- 9 Führungsstange
- 10 Schlauchverbindung



Figur 2.

Kornstorleksfördelning av undersökningsjorden i försök 1 och 5 (Håkansson 1966).





FIGUR 4

Luftpermeabiliteten som funktion av
Kozeny-faktorn E.

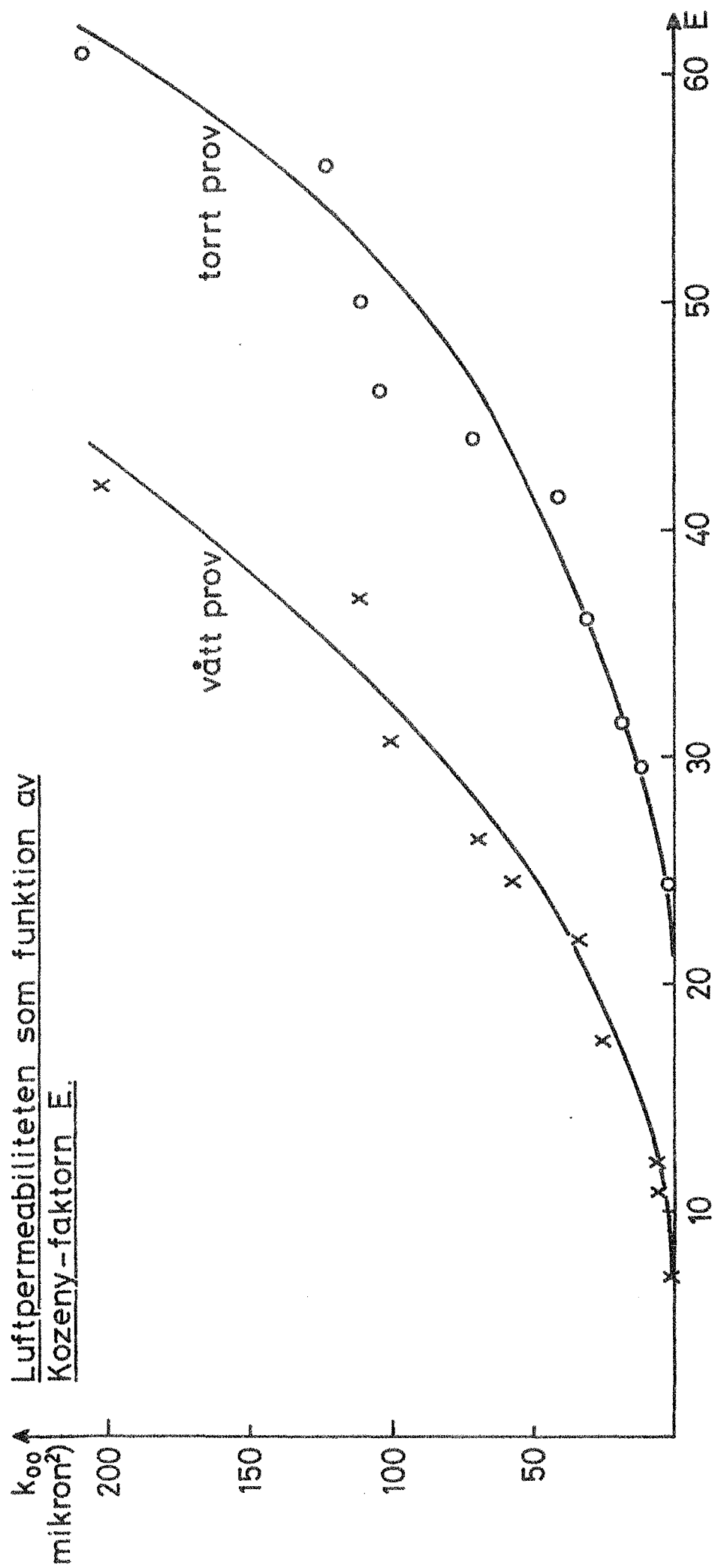


Bild 1.

Fotografi av den vid undersökningarna använda luftpermeametern
(Knoch och Hanus 1965).

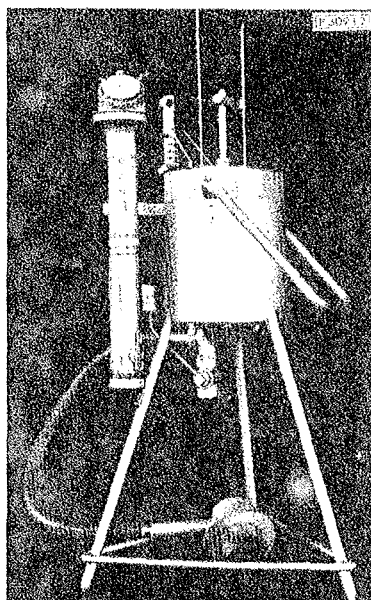


Bild 2.

Olika utvecklade sårader i ett fältförsök med direktsådd av höstrybs.

Bild 3.

Fläckvis dåligt utvecklade partier i ett fältförsök med direktsådd av höstrybs.

VIII. Litteraturhänvisningar
=====

- Adams, P.E., Blake, G.R. et. al., 1960: Influences of soil compaction on crop and development, 7.th Int. Congr. of Soil Sci., 607 - 615.
- Andersson, S., Håkansson, I., 1963: Markfysikaliska undersökningar i odlad jord XIV. Om ett par nya metoder att bestämma markytans mikrotopografi, dess höjdförändringar och matjordens porositet. Grundförbättring 16, 1 - 26.
- Baver, L.D., 1938: Soil permeability in relation to non-capillary porosity, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 3, 52 - 56.
- Carman, P.C., 1956: Flow of gases through porous media, New York, Academic Press, Inc.
- Evans, D.D., Kirkham, R.W., 1957: Mesurments of air permeability of soil in situ. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14, 65 - 73.
- Fergedal, L., 1963: Fältförsök med olika packningsgrader på styv lera. Sammanfattning av examensarbete i allmän jordbrukslära.
- Fergedal, L., 1965: Utvidgad försöksverksamhet med jordpackning och ältning. Stencil vid avd. för jordbearbetning.
- Fergedal, L., 1966-: Under utarbetande. Avd. för jordbearbetning.
- Grover, B.L., 1955: Simplified permeameters for soil in place. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19, 414 - 418.
- Håkansson, I., 1966: Fysikalisk och kemisk beskrivning av markprofiler från 8 platser i Uppland och Västergötland. Meddelande från inst. för växtnäringslära och jordbearbetning.
- Janse, A.R.P., Bolt, G.H., 1960: The determination of the air-permeability of soils, Netherlands J. Agricultural Sci. 8:2, 124 - 131.
- Kirkham, D., 1947: Field method for determination of air-permeability of soil in its undisturbed state, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 11, 93 - 99.
- Kirkham, D., de Boodt, M., de Leenheer, L., 1959: Air permeability at the field capacity as related to soil structure and yields. Proc. int. Symp. Soil Struct., 377 - 391.
- Kmoch, M.G., 1961: Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Bodens und ihre Bedeutung für einige ackerbauliche Probleme. Gebr. Borntraeger Berlin-Nikolassee.

- Knoch, M.G., Hanus, M., 1965: Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. Z. Pflanzen-ernähr. Düng. Bodenk. 1, 1 - 10.
- Kozeny, J., 1933: Über Bodendurchlässigkeit. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. A 28, 54 - 66.
- Lambe, T.W., 1954: The permeability of fine-grained soils. Symp. on Permeability of Soils Amer. Soc. Testing Materials Techn. Pub. 163, 56 - 67.
- SOIL SCIENCE OF AMERICA, 1952: Report of subcommittee on terminology, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16, 85 - 88.
- Tanner, C.B., Wengel, R.W., 1957: An air permeameter for field and laboratory use. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21, 663 - 664.
- Torstensson, G., Eriksson, S., 1936: A new method for determining the porosity of soil, Soil Sci. 42:6, 405 - 415.
- Zunker, F., 1938: Vorschläge für Begriffsbildungen in der Boden- und Grundwasserkunde, Bodenk. Forschungen 6. 202 - 216.